

doi:10.18286/1816-4501-2023-4-222-228

УДК 633.52:631.352.5

Исследование бесподпорного среза стеблей лубяных культур

Р. А. Попов✉, кандидат технических наук, ведущий научный сотрудник лаборатории агроинженерных технологий

С. В. Прокофьев, научный сотрудник лаборатории агроинженерных технологий

ФГБНУ «Федеральный научный центр лубяных культур»

170041, РФ, г. Тверь, Комсомольский проспект, 17/56

✉ r.popov@fncl.ru

Резюме. Разработка и исследование рабочих органов для уборки лубяных культур имеет большое практическое значение для отечественного АПК и повышения уровня его технической оснащенности. Статья посвящена результатам теоретических и экспериментальных исследований бесподпорного среза стеблей лубяных культур ротационным режущим аппаратом. Цель исследований – определение оптимальных параметров и режимов работы режущего рабочего органа, усилия и активной мощности, затрачиваемых на срез стеблей и оценка качества среза. Исследования проводили в 2021-2022 годах на базе ФГБНУ ФНЦ ЛК в лаборатории агроинженерных технологий и на опытном производстве. Оценка качества среза стеблей на микрометровом уровне осуществлена методом бесконтактной оптической профилометрии на кафедре прикладной физики ФГБОУ ВО «Тверской государственный университет». Изготовлен опытный образец режущего рабочего органа ротационного типа для среза стеблей лубяных культур. По результатам исследований получены научно-обоснованные параметры и режимы работы режущего рабочего органа: оптимальный профиль зубьев в форме окружности и в форме параболы, частота вращения режущего диска $n = 800...900 \text{ мин}^{-1}$, скорость подачи стеблей $v_{\text{тр}} = 1,4 \text{ м/с}$, которые обеспечивают наименьшее усилие (16...20 Н) и затраты активной мощности (102...122 Вт) на срез стеблей. Построение профиля сечения поверхности среза стеблей позволило оценить качество среза на микрометровом уровне и определить наиболее оптимальный профиль зубьев для получения максимальной энергоэффективности.

Ключевые слова: лубяные культуры, стебель, режущий аппарат, срез, профиль зуба, усилие среза, мощность, параметры.

Для цитирования: Попов Р. А., Прокофьев С. В. Исследование бесподпорного среза стеблей лубяных культур // Вестник Ульяновской государственной сельскохозяйственной академии. 2023. № 4 (64). 222-228 С. doi:10.18286/1816-4501-2023-4-222-228

Study of non - pressure cut of stems of bast crops

R. A. Popov✉, **S. V. Prokofiev**

Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Center of Bast Crops"

170041, Russian Federation, Tver, Komsomolsky ave., 17/56

✉ r.popov@fncl.ru

Abstract. The development and research of working bodies for harvesting of bast crops is of great practical importance for domestic agro-industrial complex and for increase of the level of its technical equipment. The article is devoted to results of theoretical and experimental studies of non - pressure cut of bast crop stems with a rotary cutter bar. The purpose of the research is to determine the appropriate parameters and operating modes of the cutting working body, the effort and active power spent on cutting the stems and assessing the quality of the cut. The research was carried out in 2021-2022 on the basis of the Federal State Budgetary Institution Federal State Budgetary Institution "Federal Scientific Center of Bast Crops" in the laboratory of agroengineering technologies and in production testing. The quality assessment of the stem cut at the micrometer level was carried out using the method of non-contact optical profilometry at the Department of Applied Physics of the Federal State Budgetary Educational Institution of Higher Education "Tver State University". A prototype of a rotary cutting tool for stem cutting of bast crops was produced. Based on the research results, scientifically based parameters and operating modes of the cutter bar were obtained: appropriate tooth profile in the shape of a circle and in the shape of a parabola, rotation speed of the cutting disk as $n = 800...900 \text{ min}^{-1}$, feed speed of the stems $v_{\text{fr}} = 1.4 \text{ m/s}$, which provides the least force (16...20 N) and power consumption (102...122 W) for stem cutting. The construction of a cross-sectional profile of the cutting

surface of the stems allowed to evaluate the quality of the cut at the micrometer level and determine the most appropriate tooth profile to obtain maximum energy efficiency.

Keywords: bast crops, stem, cutter bar, cut, tooth profile, cutting force, power, parameters.

For citation: Popov R. A., Prokofiev S. V. Study of non - pressure cut of stems of bast crops // Vestnik of Ulyanovsk state agricultural academy. 2023;4(64): 222-228 doi:10.18286/1816-4501-2023-4-222-228

Работа выполнена при поддержке Минобрнауки России в рамках Государственного задания ФГБНУ ФНЦ ЛК (№ FGSS-2022-0005).

Введение

Лубяные культуры, в частности, техническая (безнаркотическая) конопля, кенаф и др. являются ежегодно возобновляемым сырьевым источником для производства волокна, масла и иной продукции в различных отраслях экономики. Такие культуры характеризуются значительной высотой стеблестоя (в среднем 2...2,5 м и более), а также наличием в структуре стеблей прочных лубяных волокон и древесной составляющей (до 70 %) [1, 2, 3].

Срез стеблей в процессе уборки лубяных культур имеет свои особенности, что обуславливает известные трудности при работе режущих аппаратов косилок и других технических средств [4, 5]. В период технической спелости в структуре стебля формируется прочный лубоволокнистый слой, обладающий в том числе и абразивными свойствами [6], что является причиной быстрого износа режущих элементов, забивания рабочих органов и нарушений технологического процесса. Кроме того, недолговечность режущих кромок не отвечает возрастающим требованиям к современной уборочной технике [7].

В настоящее время наиболее широко применяют режущие аппараты ротационного типа, работающие по принципу бесподпорного среза, которые имеют ряд преимуществ перед аппаратами других типов – высокая скорость резания и производительность, качественный срез и незначительная забиваемость, простота конструкции и др. [8, 9, 10, 11]. Учитывая взаимодействие режущей кромки с грубоволокнистым материалом лубяных культур и большим диаметром стеблей (до 40 мм), возникает необходимость в постоянном совершенствовании рабочих органов, изыскании новых конструкторских решений, обеспечивающих не только гарантированный срез, но и увеличение ресурса режущих элементов и повышение энергоэффективности всего рабочего узла.

Существующие машины и технологии уборки лубяных культур требуют совершенствования в связи с изменением экономических условий производства и новыми задачами по повышению качества и конкурентоспособности, поэтому разработка и исследование рабочих органов для уборки лубяных культур имеет большое практическое значение в отечественном агропромышленном комплексе и повышении уровня его технической оснащенности. В связи с этим в статье представлены результаты

теоретических и экспериментальных исследований бесподпорного среза стеблей ротационным режущим аппаратом.

Цель исследований – определение оптимальных параметров и режимов работы режущего рабочего органа, усилия и активной мощности, затрачиваемых на срез стеблей, а также оценка качества среза.

Материалы и методы

Исследования проводили на базе ФГБНУ ФНЦ ЛК. Объектом исследования являлся технологический процесс бесподпорного среза стеблей лубяных культур. Методика исследований включала в себя теоретические аспекты процесса резания, получение экспериментальных данных и оценку качества среза на микрометровом уровне.

Для достижения поставленной цели рассмотрим взаимодействие ножа со стеблем лубяных культур с учетом их физико-механических и технологических свойств. Обозначим действующие силы и составим уравнения для определения критической силы, при которой в разрезаемом материале происходит разрушение связей и начинается процесс резания. При анализе мы руководствовались теорией бесподпорного среза толстостебельных культур и теорией резания лезвием [12, 13, 14, 15]. Однако из-за различия свойств и структуры стеблей резание лубяных культур имеет свои особенности.

При вхождении зуба в толщу стебля диаметром $d_{ст}$, м, на некоторую глубину b , м, на лезвие действуют силы сопротивления волокнистого слоя сжатия $F_{сж}$, Н, и обжатия лезвия растительным материалом $F_{обж}$, Н, а также силы сопротивления разрушению $F_{рез}$, Н, и силы трения $P_{тр}$, Н (рис. 1).

Критическая сила, приложенная к режущему зубу и направленная к нему по нормали $F_{кр}^N$, Н, должна преодолеть сумму следующих составляющих [15]:

$$F_{кр}^N = F_{рез} + F_{обж} + P_{тр1} + P'_{тр2}, \quad (1)$$

где: $F_{рез}$ – усилие на срез стеблей лубяных культур, Н; $P_{тр1}$ и $P_{тр2}$ – силы трения, возникающие на противоположных сторонах режущей части зуба от сил обжатия $F_{обж}$, Н.

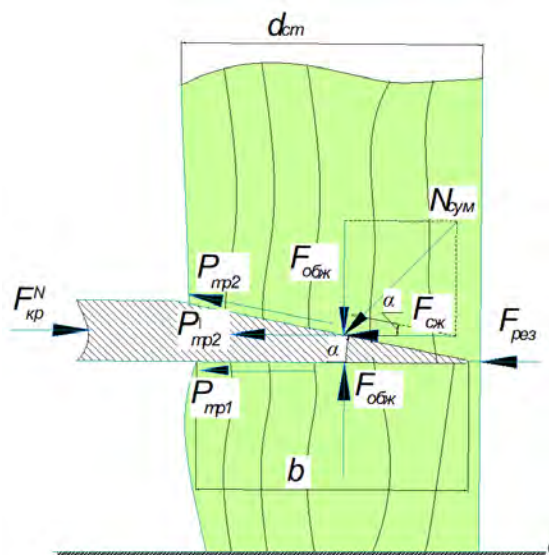


Рис. 1. Взаимодействие режущего зуба со стеблем лубяных культур

Расчетное усилие среза стеблей лубяных культур [15]:

$$F_{рез} = s\Delta l\sigma_p, (2)$$

где: s - толщина зуба, м; Δl - длина режущей кромки зуба, м; σ_p - разрушающее контактное напряжение, возникающее при срезе лубяных культур, Па.

Сила сопротивления слоя обжатию $F_{обж}$ [15]:

$$F_{обж} = F_{сж} = q_p\Delta l, (3)$$

где: q_p - удельное сопротивление резанию растительного материала, Н/м.

Сила трения [15]:

$$P_{тр1} = F_{обж}f, (4)$$

где: f - коэффициент трения растительного слоя о лезвие зуба.

Сила трения $P_{тр2}$ относительно нижней поверхности зуба направлена под углом α . Проекция силы $P'_{тр2}$ на противоположную часть лезвия [15]:

$$P'_{тр2} = f \left(F_{сж} \frac{1}{2} \sin 2\alpha + F_{обж} \cos^2 \alpha \right). (5)$$

Подставим в выражение (1) все составляющие, противодействующие $F_{кр}^N$ [15]:

$$F_{кр}^N = s\Delta l\sigma_p + q_p\Delta l + q_p\Delta lf + f \left(q_p\Delta l \frac{1}{2} \sin 2\alpha + q_p\Delta l \cos^2 \alpha \right),$$

и после преобразования получим:

$$F_{кр}^N = s\Delta l\sigma_p + q_p\Delta l \left[1 + f \left(\frac{\sin 2\alpha}{2} + \cos^2 \alpha \right) \right]. (6)$$

Затрачиваемое усилие, мощность на срез, параметры и режимы работы режущего устройства определяли экспериментальным путем, для чего была изготовлена лабораторная установка в виде стационарного режущего аппарата ротационного типа. Она состоит из рамы 1, углового редуктора 2, режущего диска 3 диаметром 800 мм со сменными зубчатыми сегментами 4 различного профиля. Для привода режущего аппарата установлен электродвигатель 5 мощностью 1,5 кВт. Подача стеблей, расположенных вертикально рядками и закрепленных консольно, осуществлялась транспортером 6 для имитации среза растений в полевых условиях.

Транспортер 6 вращался от электродвигателя 7 мощностью 1,1 кВт. Частоту вращения режущего диска и скорость подачи стеблей регулировали преобразователями частоты вращения «ВЕСПЕР» Е2-8300. Усилие среза стеблей определяли при помощи тензобалки с резистором, операционного усилителя на базе чипа НХ-711, управляющего контроллера типа АТмега 328/Р; данные передавались в ноутбук. Активную мощность на срез измеряли прибором ЩМ-120 (рис. 2).

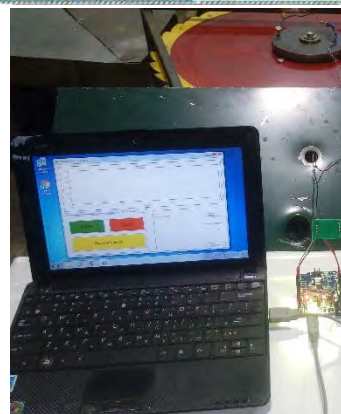
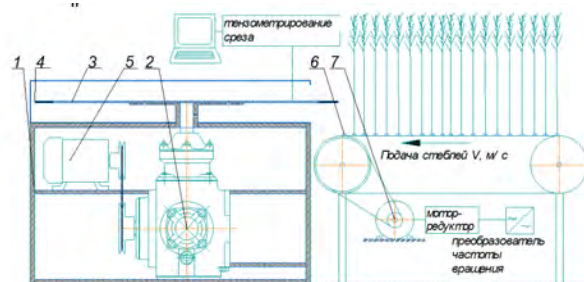


Рис. 2. Схема лабораторной установки и измерительное оборудование: 1 – рама; 2 – угловой редуктор; 3 – режущий диск; 4 – зубчатые сегменты; 5 – электродвигатель режущего аппарата; 6 – транспортер подачи; 7 – электродвигатель привода транспортера

В качестве исследуемого материала лубяных культур использовали стебли посевной (технической) конопля из Пензенской области сортов Надежда и Людмила среднерусского экотипа. Исходные данные и характеристика исследуемого материала приведены в табл. 1.

Таблица 1. Характеристика исследуемых стеблей конопля

Показатель	Значение показателей для сортов	
	Надежда	Людмила
Влажность, %	50...60	60...70
Урожайность стеблей, т/га	9,0	12,3
Средняя высота, м	1,5	1,5
Среднее количество на 1 м, шт.	40	40
Диаметр: max/min, мм:	10/14	12/20
Содержание волокна, %	26...29	30...33

Исследования проводили по методике планирования многофакторного эксперимента [16, 17].

Частоту вращения режущего диска n варьировали в диапазоне $10...16,67 \text{ с}^{-1}$. Срез осуществляли режущими сегментами с зубьями в форме параболы (профиль 1), окружности (профиль 2) и скругленной трапеции (профиль 3) с различным их количеством, шагом и высотой, специально разработанных для лубяных культур с учетом особенностей строения стебля [15, 18]. При составлении матрицы планирования эксперимента были выбраны следующие факторы и уровни их варьирования (табл. 2).

Таблица 2. Матрица планирования эксперимента

Фактор	Обозначение		Уровень варьирования факторов			Интервал варьирования
	Натуральное	Кодированное	Верхний	Нулевой	Нижний	
			+	0	-	
Подача стеблей, м/с	втр	X1	1,4	1,3	1,2	0,1
Профиль зуба	Пр	X2	парабола	трапеция	окружность	1

В ходе исследований учитывали факторы, оказывающие наибольшее влияние на процесс и качество среза, такие как диаметр стеблей, частота вращения диска, скорость подачи стебельной массы, профиль режущего зуба.

Выбранные факторы кодировали, используя выражение:

$$X_i = \frac{x_i - x_{i0}}{A}, \quad (7)$$

где: X_i и x_i – соответственно кодированное и натуральное значение фактора; x_{i0} – натуральное значение фактора на основном уровне; A – натуральное значение интервала варьирования факторов.

За параметры оптимизации выбраны усилие среза стеблей Y_1 и затрачиваемую на срез активную мощность Y_2 . По полученным значениям факторов были получены математические модели процесса среза стеблей в виде уравнений регрессии второго порядка:

$$Y = a_0 + \sum^n a_i X_i + \sum_{i < j}^n a_{ij} X_i X_j + \sum^n a_{ii} X_i^2, \quad (8)$$

где: X_i, X_j – значения факторов; a_0 – свободный член, равный выходу при $X_i = 0$; a_0 – эффекты соответствующих факторов влияния на изучаемый объект; a_{ij} – эффекты взаимодействий соответствующих факторов; a_{ii} – эффекты при квадратичных членах.

На заключительном этапе построен профиль сечений среза методом бесконтактной оптической профилометрии с помощью интерференционного профилометра высокого разрешения NanoMap WLI-1000 [19].

Результаты

В ходе исследований визуально установлено, что наиболее чистый и качественный срез осуществляется сегментами с параболической формой зуба

за счет большей длины режущей кромки, превышающей диаметр стебля. Сегменты с зубьями в форме окружности также обеспечивают качественный срез. Зубья в форме трапеции оказывают большее ударное воздействие на разрезаемый материал, при котором лезвие начинает рубить стебель. Качество среза стеблей показано на рис. 3.



Рис. 3. Качество среза стеблей зубьями различных профилей: а) в форме параболы; б) в форме окружности; в) в форме трапеции

На основе симметричного композиционного плана Бокса второго порядка получены регрессионные модели, адекватные экспериментальным данным, характеризующие зависимости усилия среза стеблей $P_{ср}$, N , и затрачиваемой активной мощности $N_{ср}$, W_t , от скорости подачи стеблей к режущему аппарату $v_{тр}$, м/с, и формы (профиля) ножа $Пр$:

$$P_{ср} = 23,8 + 0,14X_1 + 0,18X_2 - 0,07X_1X_2 - 0,06X_1^2 - 0,035X_2^2 \quad (9)$$

$$N_{ср} = 155,1 + 8,89X_1 - 7,06X_2 + 3,42X_1X_2 + 2,33X_1^2 - 38,5X_2^2 \quad (10)$$

где: X_1 и X_2 - кодированные значения факторов, соответственно $v_{тр}$ и $Пр$.

Анализ уравнений регрессии (9) и (10) показывает, что наибольшее влияние на параметры оптимизации оказывает фактор X_2 – профиль режущей кромки зубьев. Для полученных регрессионных моделей построены поверхности отклика, представляющие собой эллиптический параболоид, и их двухмерные сечения (рис. 4 - 5).

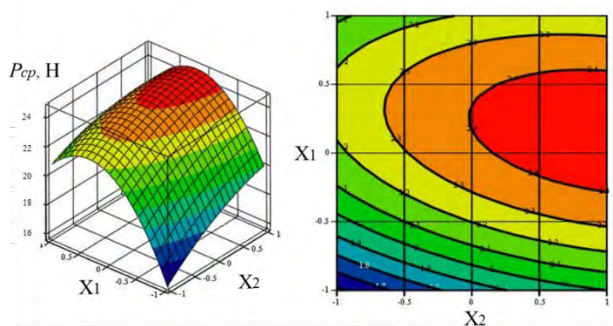


Рис. 4. Поверхность отклика, характеризующая зависимость усилия среза P_{cp} от скорости подачи стеблей X_1 и формы (профиля) зубьев X_2 и ее двухмерное сечение

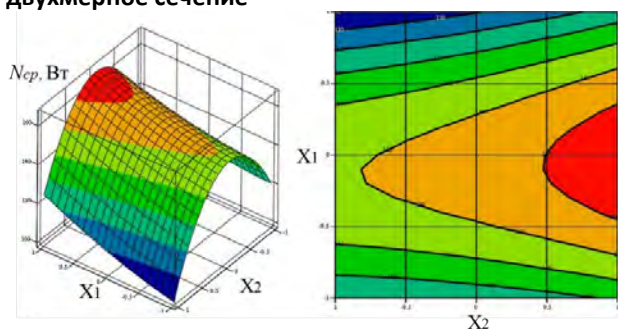


Рис. 5. Поверхность отклика, характеризующая зависимость мощности, требуемой на срез N_{cp} , от подачи стеблей X_1 и (профиля) зубьев X_2 и ее двухмерное сечение

Анализ полученных поверхностей показывает, что с увеличением скорости подачи стеблей к режущему аппарату возрастает усилие на срез стеблей, особенно при срезе ножом трапециевидной формы, достигая при этом наибольших значений (24 Н), а затем наблюдается некоторое снижение усилия. Это объясняется тем, что с ростом скорости подачи увеличивается количество срезаемых стеблей в единицу времени и возрастает нагрузка на режущий аппарат. При этом режущая кромка в форме трапеции оказывает ударное воздействие, и зуб начинает рубить стебли. Наименьшее усилие на срез стеблей (16...20 Н) затрачивает нож с профилем зубьев в виде окружности за счет формы режущей кромки и наибольшего количества зубьев на диске.

На затраты мощности наибольшее влияние оказывают форма режущей кромки лезвия, коэффициент скольжения лезвия и качество среза. С увеличением подачи стеблей мощность, требуемая на срез, возрастает, достигая своего максимума при скорости подачи стеблей 1,3 м/с, затем снижается до минимальных значений. При этом наименьший расход энергии наблюдается у режущих сегментов с параболической формой зубьев и выполненными в форме окружности (102...122 Вт). Это обеспечивается за счет оптимального угла среза стеблей, угла заточки режущей кромки и высокой скорости резания.

По результатам исследований построены трехмерные карты высот поверхностей среза стеблей [20] (рис. 6).

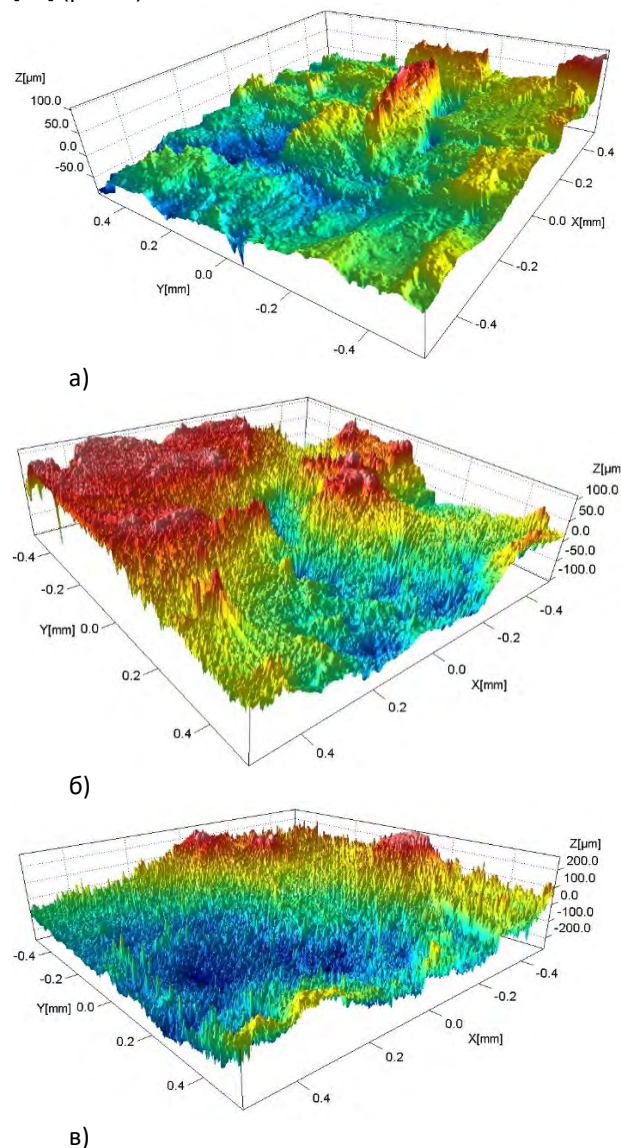


Рис. 6. 3D карты высот сечений среза стеблей лубяных культур зубьями: а) в форме параболы; б) окружности; в) трапеции

Анализ поверхностей среза на микрометровом уровне показывает, что зубья в форме параболы обеспечивают наименьшие разрушения в приповерхностном слое стебля. Это объясняется равномерным выдавливанием волокон на режущую кромку за счет наибольшего скольжения лезвия, в связи с чем парабола представляется наиболее энергоэффективным профилем. Зубья в форме окружности оставляют узкие и глубокие впадины, что свидетельствует о разрушении волокон по типу «разрыв», которые сначала вытягиваются, затем разрываются в слабых местах. При срезе зубьями в форме трапеции визуализируются крупные разрушения волокон, не характерные для чистого среза.

Обсуждение

При рассмотрении взаимодействия ножа со стеблем лубяных культур в процессе бесподпорного среза получены аналитические зависимости для определения критической силы резания, которые показывают, что разрушение связей в стеблях и начало процесса резания происходит в предварительно сжатом материале при превышении величины разрушающего контактного напряжения. Экспериментальные исследования с использованием теории планирования эксперимента позволили выявить оптимальный профиль режущей кромки в форме параболы, при котором достигаются наименьшие усилие резания и активная мощность на срез стеблей. Оценка качества среза на микрометровом уровне позволила получить практическое подтверждение правильности оптимизации параметров и режимов работы режущего рабочего органа.

Заключение

По результатам исследований получены научно-обоснованные параметры и режимы работы режущего рабочего органа для бесподпорного среза стеблей лубяных культур: оптимальный профиль зубьев - в форме параболы и в форме окружности, частота вращения режущего диска $n = 13,3...15 \text{ с}^{-1}$, скорость подачи стеблей $v_{\text{тр}} = 1,4 \text{ м/с}$, которые обеспечивают наименьшее усилие (16...20 Н) и затраты активной мощности (102...122 Вт) на срез. Оценка качества среза стеблей на микрометровом уровне позволила определить, что наиболее оптимальным профилем зубьев с точки зрения энергозатрат является парабола. Результаты исследований будут использованы в дальнейшем при разработке и изготовлении опытного образца multifunctional адаптера для уборки лубяных культур.

Литература

- Новиков Э. В., Басова Н. В., Безбабченко А. В. Лубяные культуры в России и за рубежом: состояние, проблемы и перспективы их // Технические культуры. Научный сельскохозяйственный журнал. 2021. № 1. С. 30–40.
- Кабунина И. В. Современная структура мирового рынка производства конопли // Международный сельскохозяйственный журнал. 2021. № 4 (382). С. 40–44.
- Машинно-технологическое оснащение селекции и семеноводства технических культур: научный аналитический обзор / Р. А. Ростовцев и др. Москва: ФГБНУ Росинформагротех, 2019. 80 с. – ISBN 978-5-7367-1536-7.
- Дмитриев С. Ю. Оптимальные параметры среза стеблей конопли // Сельскохозяйственные машины и технологии. 2014. № 4. С. 26–28.
- Kemper S. Analysis of the overlayind cut in rotary mowers / S. Kemper, Th. Lang, L. Frerichs // Landtechnik. Agricultural Engineering. 2012. № 5. P. 346–349.
- Исследование морфологических и технологических свойств стеблей новых сортов конопли / Е. Л. Пашин, С. В. Жукова, Л. В. Пашина и др. // Известия высших учебных заведений. Технология текстильной промышленности. 2010. № 4 (325). С. 21–24.
- Алдошин Н. В., Золотов А. А., Лылин Н. А. Пути повышения качества работы косилок и жаток // Вестник ФГБОУ Московский государственный агроинженерный университет им. В.П. Горячкина. 2017. Вып. 4(80). С. 7–13.
- Догота П. А. Анализ существующих теорий работы ротационного режущего аппарата косилки для скашивания сидератов в междурядьях многолетних насаждений / П. А. Догота, В. В. Красовский // Научные труды ЮФ НУБиПУ «КАТУ». Симферополь, 2013. Вып. 153. – С. 164–175.
- Анализ технологического процесса кошения растений ротационными режущими аппаратами / В. Б. Попов, П. Е. Голушко, А. А. Иванов и др. // Вестник ГГТУ им. П.О. Сухого. 2009. № 4 (73). С. 32–39.
- Будашов И. А. Обоснование параметров ротационно-дискового режущего аппарата для резания толсто-стебельных культур : спец. 05.20.01 «Технологии и средства механизации сельского хозяйства: автореферат диссертации на соискание учёной степени кандидата технических наук / Будашов Игорь Александрович; Алтайский государственный технический университет им. И.И. Ползунова. Барнаул, 2013. 22 с.
- Особов В. И. Механическая технология кормов. Москва: Колос, 2009. 344 с. – ISBN 978-5-10-004036-1.
- Босо, Е. С. Теория, конструкция и расчет сельскохозяйственных машин / Е. С. Босой, О. В. Верняев. – Москва: Машиностроение, 1978. 568 с.
- Резник Н. Е. Теория резания лезвием и основы расчета режущих аппаратов / Н. Е. Резник. Москва: Машиностроение, 1975. 311 с.
- Фундаментальные особенности процесса резания пищевых продуктов лезвийным инструментом / В. В. Пеленко и др. // Процессы и аппараты пищевых производств. 2008. № 1. С. 40–42.
- Попов Р. А., Абрамов И. Л. К вопросу теоретического обоснования и разработки режущего рабочего органа для уборки технической конопли // Техника и оборудование для села. 2021. № 8. С. 22–26.
- Мельников С. В., Алешкин В. Р., Рошин П. М. Планирование эксперимента в исследованиях сельскохозяйственных процессов / С. В. Мельников-Ленинград : Колос, 1972. 200 с.
- Хайлис Г. А., Ковалев М. М. Исследование сельскохозяйственной техники и обработка опытных данных. Москва: Колос, 1994. 169 с. – ISBN 5-10-003090-9.

4.3.1. Технологии, машины и оборудование для агропромышленного комплекса (технические науки)

18. Popov R. A., Krupnov A. V. Research impact of cutting tooth shapes on energy consumption when cutting technical hemp stems // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2022. No. 2. P. 103-110.

19. SPIP – Analytical Software for Microscopy. URL: [http:// www.imagemet.com/products/spip](http://www.imagemet.com/products/spip) дата обращения 20.04.2023.

20. Попов Р. А., Абрамов И. Л., Третьяков С. А. Влияние профиля режущей кромки на качество среза стеблей технической конопли // Аграрный научный журнал. 2023. № 4. С. 137-141.

References

1. Novikov E. V., Basova N. V., Bezbabchenko A. V. Bast crops in Russia and abroad: state, problems and prospects for their processing // Technical crops. Scientific Agricultural Journal. 2021. №1. P. 30–40.

2. Kabunina I. V. Modern structure of the world hemp production market // International Agricultural Journal. 2021. №4 (382). P. 40-44.

3. Machine-technological equipment for selection and seed production of technical crops: scientific analytical review / R. A. Rostovtsev et al. Moscow: FSBSI Rosinformagrotekh, 2019. 80 p. – ISBN 978-5-7367-1536-7.

4. Dmitriev S. Yu. Appropriate parameters for hemp stem cutting // Agricultural machines and technologies. 2014. №4. P. 26-28.

5. Kemper S. Lang Th., Frerichs L. Analysis of the overlayind cut in rotary mowers // Landtechnik. Agricultural Engineering. 2012. №5. P. 346-349.

6. Study of the morphological and technological properties of stems of new varieties of hemp / E. L. Pashin, S. V. Zhukova, L. V. Pashina et al. // News of higher educational institutions. Textile industry technology. 2010. №4(325). – P. 21-24.

7. Aldoshin N. V., Zolotov A. A., Lylin N. A. Ways to improve the operational quality of mowers and reapers // Vestnik of the Federal State Budgetary Educational Institution Moscow State Agricultural Engineering University named after V. P. Goryachkin. 2017. Issue. 4(80). P. 7-13.

8. Dogota P. A., Krasovsky V. V. Analysis of the existing theories of operation of the rotary cutting device of a mower for green manure mowing in the inter-rows of perennial plantings // Scientific works of Southern branch of the National University of Bioresources and Environmental Management "Crimean State Agrotechnological University". Simferopol, 2013. Issue. 153. – P. 164–175.

9. Analysis of the technological process of mowing plants with rotary cutting devices / V. B. Popov, P. E. Golushko, A. A. Ivanov et. al // Vestnik GSTU named after P.O. Sukhoi. 2009. №4 (73). P. 32-39.

10. Budashov I. A. Justification of the parameters of a rotary-disk cutting device for cutting of thick-stemmed crops: spec. 05.20.01 “Technologies and means of mechanization of agriculture: abstract of a dissertation for the degree of Candidate of Technical sciences / Budashov Igor Aleksandrovich; Altai State Technical University named after I. I. Polzunov. - Barnaul, 2013.- 22 p.

11. Osobov V. I. Mechanical technology of feeds. Moscow: Kolos, 2009. 344 p. – ISBN 978-5-10-004036-1.

12. Bosoy E. S. Theory, design and calculation of agricultural machines / Bosoy E. S., Vernyaev O. V. Moscow: Mechanical Engineering, 1978. 568 p.

13. Reznik N. E. Theory of cutting with a blade and the basics of calculation of cutting devices. – Moscow: Mechanical Engineering, 1975. – 311 p.

14. Fundamental features of the process of cutting food products with blade tools / V. V. Pelenko et al. // Processes and devices of food production. 2008. №1. P. 40-42.

15. Popov R. A. Abramov I. L. On the issue of theoretical justification and development of a cutting working body for harvesting of industrial hemp // Machinery and equipment for the village. 2021. №8. P. 22-26.

16. Melnikov S.V. Aleshkin V. R., Roshchin P. M. Planning an experiment in research of agricultural processes. Leningrad: Kolos, 1972. 200 p.

17. Khailis G. A., Kovalev M. M. Research of agricultural machinery and processing of experimental data. Moscow: Kolos, 1994. 169 p. – ISBN 5-10-003090-9.

18. Popov R. A., Krupnov A. V. Research impact of cutting tooth shapes on energy consumption when cutting technical hemp stems // Taurida Herald of the Agrarian Sciences. 2022. №2. P. 103-110.

19. SPIP – Analytical Software for Microscopy. URL: [http:// www.imagemet.com/products/spip](http://www.imagemet.com/products/spip) access date 20.04.2023.

20. Попов Р. А., Абрамов И. Л., Третьяков С. А. The influence of the cutting edge profile on the cut quality of industrial hemp stems // Agricultural Scientific Journal. 2023. №4. P. 137-141.